

Использование мощных источников излучения для обеззараживания зерна

А. В. Бибергаль, У. Я. Маргулис, Е. С. Перцовский

Описан проект экспериментальной полупроизводственной установки для обеззараживания зерна при помощи γ -излучения Co^{60} . Облучатель выполнен в виде полого цилиндра, по образующим которого расположены 20 активных стержней общей активностью 100 000 *г-экв* радия. Установка имеет водяную защиту. Подача зерна под облучение автоматизирована. Производительность установки 1,85 *т/час*. При создании промышленных установок для лучевого обеззараживания зерна использование Co^{60} нерационально из-за высокой стоимости. Гораздо выгоднее пользоваться продуктами деления урана, являющимися отходами атомной промышленности. Ввиду низкой удельной активности продуктов деления важнейшим вопросом является выбор наиболее рациональной конфигурации облучателя. Расчеты показывают, что наиболее выгодными являются ячеиковые облучатели. Рассматривая 3 типа ячеиковых облучателей: цилиндрический, стержневой и щелевой, авторы приходят к выводу, что более рационально применение щелевых облучателей, которые дают наиболее высокую производительность на единицу объема установки. Производительность такого облучателя 31 *т/час* при суммарной активности $3,72 \cdot 10^6$ *кюри*. Относительно небольшой вес такой установки (включая защиту) позволяет свободно транспортировать ее от одного зернохранилища к другому.

Использование интенсивных источников радиоактивных излучений имеет перспективу главным образом в терапии, при стерилизации и консервировании различных продуктов, в химической промышленности для получения необходимых химических и физико-химических превращений в различных веществах, и, наконец, при биологических и физико-химических исследованиях. Каждое из указанных направлений предъявляет свои специфические требования к конструкции и условиям работы мощных облучателей. Поэтому любые расчеты в этой области немедленно должны базироваться на конкретных исходных данных. Задача настоящей работы—выяснить ряд важных вопросов использования мощных изотопных облучателей для обеззараживания зерна. Многие выводы этой работы могут оказаться полезными и в других случаях применения облучателей.

В литературе имеются описания и расчеты мощных облучателей различных конструк-

ций, предназначенных для стерилизации пищевых продуктов, а также для биологических экспериментов [1]—[7].

Как можно заключить из этих данных, до сих пор существует тенденция использовать при проектировании промышленных установок лишь простые формы облучателей (стержень, плоскость), и лишь в одной работе [2] предлагается облучатель комбинированного типа, состоящий из 14 стержней, наполненных продуктами деления. Для биологических исследований, как правило, применяются облучатели в виде полого цилиндра, что объясняется стремлением получить наиболее равномерное лучевое поле.

Экспериментальная полупроизводственная установка для обеззараживания зерна

Использование γ -излучения для обеззараживания зерна весьма перспективно.

Дозы, необходимые для лучевого обеззараживания зерна путем полевой стерили-

заций вредных насекомых, находящихся в зерне, не превосходят 10 000 р. Однако для использования лучевого обеззараживания зерна в промышленном масштабе необходимо предварительно изучить вопросы, связанные с облучением больших количеств зерна, и создать экспериментальную полупроизводственную установку, которая должна иметь достаточную производительность (порядка 0,5 т/час), хорошую равномерность распределения дозы (в пределах $\pm 10\%$), и давать возможность точно регулировать общую дозу. Всем этим требованиям удовлетворяет источник в виде полого цилиндра.

Выбор цилиндрической формы облучателя основан на проведенных в 1952 г. работах [8]—[10] по расчету и экспериментальному исследованию лучевого поля этого вида облучателей и созданию установки ЭГО-1 на 200 *кюри* для экспериментального облучения биологических объектов. Такая же форма облучателя затем была использована В. Г. Хрущевым для создания мощной экспериментальной установки ЭГО-2 на 10 000 *г-экв* радия. Обе действующие установки полностью оправдали себя в работе.

Защита установки ЭГО-1 была выполнена в виде бетонного блока с автоматизированной подачей объектов в поле облучения. Защита установки ЭГО-2—в виде водяного бассейна; закладка объектов в установку производилась вручную.

В описываемом ниже проекте установки ЭГУ-Со⁶⁰-100 000 учтен опыт этих установок. Из установки ЭГО-2 заимствована схема водяной защиты, но предусмотрена автоматическая поточная система подачи объектов в поле облучения с помощью конвейера с вагонетками, непрерывно проходящими через облучатель.

План и разрез установки ЭГУ-Со⁶⁰-100 000 показаны на рис. 1 и 2.

Бассейн *I* предназначен для разрядки контейнеров и подготовки стержней с препаратами, помещаемых в установку. В бассейне *II* находится облучатель—цилиндрическая клетка, состоящая из 20 стержней. Крепление стержней пружинное, позволяющее легко вставлять и вынимать стержни. Держатель со стержнями поворачивается вокруг

своей оси, что позволяет при зарядке поочередно заменять стержни, когда они находятся в верхнем положении.

Через облучатель проходит водонепроницаемая труба диаметром 300 мм из нержа-

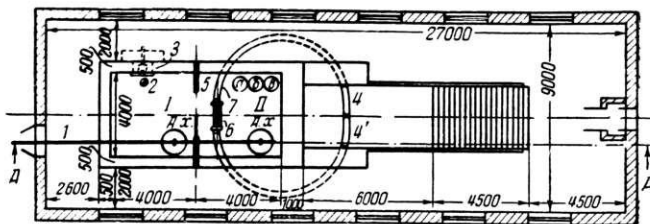


Рис. 1. План экспериментальной установки для облучения зерна.

1—монорельс; 2—место препарата при измерении; 3—дозиметр; 4—место загрузки вагонеток; 4'—место разгрузки вагонеток; 5—шлюз; 6—облучатель; 7—труба с вагонетками; а, б, в—маркированные ведерки для измеренных препаратов; А, Б—эварийные хранилища.

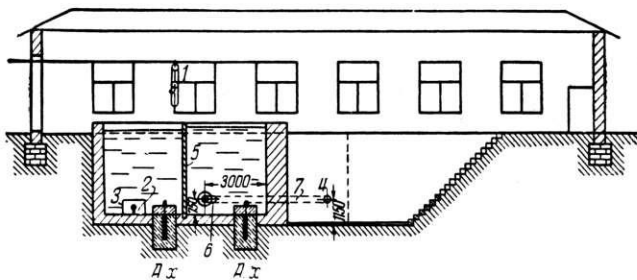


Рис. 2. Разрез экспериментальной установки для облучения зерна.

1—таль 1,5 т на монорельсе; 2—место препарата при измерении; 3—защитная свинцовая плита с диафрагмой; 4—место разгрузки вагонеток; 5—шлюз; 6—облучатель; 7—труба с вагонетками; А.х.—аварийные хранилища.

входящей стали толщиной 1—2 мм. Внутри этой трубы в горизонтальной плоскости перемещается бесконечная цепь вагонеток с облучаемым продуктом. Там же укреплена направляющая, обеспечивающая правильное положение вагонеток при их движении. Загрузка и разгрузка вагонеток происходит автоматически в пунктах 4 и 4' (рис. 1). На участке разгрузки направляющая делает один виток по спирали, в результате чего вагонетки переворачиваются, а затем приходят опять в прежнее положение. На одной из вагонеток устанавливается прибор, позволяющий контролировать дозу, полученную за один проход вагонетки через облучатель. Суммарная доза регулируется скоростью передвижения цепи вагонеток.

Пульт управления помещен в приямке перед лицевой стенкой бассейна II. Бассейны разделены шлюзом, позволяющим осушать один из бассейнов. Разведение створок шлюза может быть небольшим—не более 20—30 см. Внутри бассейнов предусмотрено освещение для визуального наблюдения за операциями по зарядке и разрядке установок.

В стенке бассейна I смонтирована ионизационная камера дозиметра для измерения активности препаратов перед зарядкой облучателя.

В бассейнах I и II имеются аварийные хранилища, в которые помещаются препараты во время ремонта установки. Аварийные хранилища представляют собой чугунные контейнеры с отверстием диаметром 20 см. Контейнер закрывается чугунной пробкой толщиной 45 см.

Защита аварийных хранилищ рассчитана таким образом, что она обеспечивает безопасную работу внутри осушенного бассейна в течение 1 часа.

Расчет показывает, что трехметрового слоя воды вполне достаточно для создания безопасных условий работы над бассейном при общей активности препаратов 100 000 г-экв радия.

Стенка бассейна, примыкающая к пульту управления, также не требует дополнительной защиты. Однако, учитывая возможность непредвиденной аварии, которая может привести к быстрой утечке воды из бассейна II, эту стену следует делать из бетона толщиной 100 см. В этом случае безопасная работа у пульта управления может продолжаться в течение 0,5 часа даже при отсутствии воды в бассейне II.

Вторым вариантом является предложенная недавно А. В. Бибергалем и Е. С. Перцовским комбинированная защита (рис. 3), которая выгодна тем, что не требует никаких аварийных устройств на случай утечки воды, а также систематической смены воды в бассейнах, так как работа производится при не наполненном бассейне. Вода заливается в бассейн только на время зарядки или разрядки установки, а по окончании этих операций откачивается, защитой служит бетонный блок. Во многих случаях и, в частности, когда имеются трудности с водоснабжением, подобный вариант защиты, по-видимому, может оказаться наиболее рациональным.

Источник излучения на установке ЭГУ-Со⁶⁰-100 000 представляет собой полый цилиндр, образованный 20 трубками, наполненными препаратами Со⁶⁰ общей активностью 100 000 г-экв радия. Трубки расположены по образующим цилиндра, и поле внутри последнего не отличается от поля при равномерном распределении изотопа на поверхности цилиндра. Размеры облучателя: длина (L)—100 см, внутренний диаметр (d)—30 см.

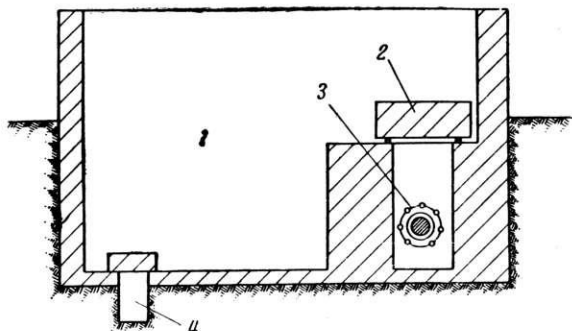


Рис. 3. Схема облучателя с комбинированной защитой.

1—бассейн; 2—передвижная крышка; 3—облучатель; 4—аварийное хранилище.

Расчеты показывают, что если поперечный размер объекта равен радиусу цилиндра, то перепад дозы в центре и на краях объекта не превышает 10%.

В установке используются препараты Со⁶⁰ с удельной активностью порядка 4,3 кюри, имеющие стандартные размеры: $d=6$ мм, $L=78$ мм. При таком диаметре можно пренебречь поглощением излучения в препаратах.

Расчет лучевого поля внутри цилиндра (рис. 4) в цилиндрических координатах приводит к выражению

$$D_A = \int_0^L \int_0^{2\pi} \frac{k \cdot q \cdot t \cdot R \cdot d\varphi \cdot dz}{R^2 + b^2 - 2Rb \cos \varphi + (z_0 - z)^2}, \quad (1)$$

где k —ионизационная постоянная, равная 8,4 р/м кюри см час; q —активность единицы поверхности в кюри/см²; t —время; R —радиус цилиндра; b и z_0 —координаты точки А.

Уравнение интегрируется только в том случае, если $b=0$, т. е. при положении точки А на оси цилиндра; тогда, учитывая,

что $q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R}$ (где Q — общая активность), получаем:

$$D_A = \frac{k \cdot Q \cdot t}{L \cdot R} \left(\arctg \frac{L - z_0}{R} + \arctg \frac{z_0}{R} \right), \quad (2)$$

где z_0 — расстояние точки A от конца облучателя.

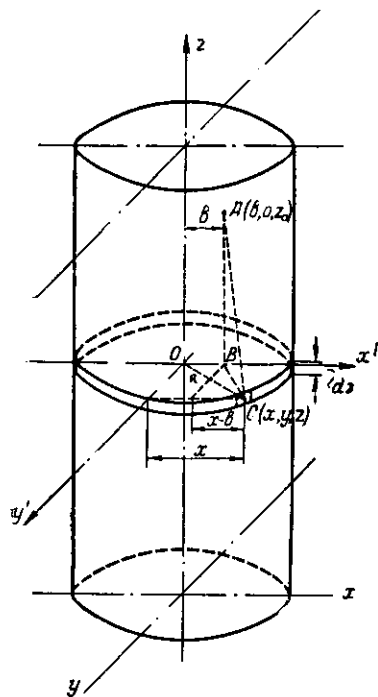


Рис. 4. Схема расчета лучевого поля внутри цилиндра.

Наконец, для положения точки A в центре цилиндра, т. е. при $z_0 = 1/2 L$, имеем:

$$D_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot k \cdot Q \cdot t}{L \cdot R} \arctg \frac{L}{2 \cdot R}. \quad (3)$$

Для проектируемого облучателя на 100 000 г-эвс радия был рассчитан ряд ориентировочных величин, а именно зависимость дозы, получаемой объектом, от скорости движения v :

$$D_{\bullet} = \frac{k \cdot Q}{v \cdot L \cdot R} \left[2 \cdot L \cdot \arctg \frac{L}{R} - R \cdot \ln(R^2 + L^2) + R \cdot \ln R^2 \right],$$

и зависимость производительности от требуемой дозы

$$\Pi = 1850 \frac{10^4}{D_0} \text{ кг/час.}$$

При изменении дозы от 10 000 р, требуемых для обеззараживания зерна, до 10^6 р, требуемых для полной стерилизации, производительность хотя и падает очень сильно, но еще позволяет облучать десятки килограммов в час, т. е. проводить эксперименты в достаточно широком масштабе.

Возможности использования продуктов деления в промышленных облучателях

Для создания промышленных облучателей использование Co^{60} не рационально, так как на производство этого изотопа приходится затрачивать большое количество энергии.

В качестве дешевых источников γ -излучения можно использовать продукты деления урана, являющиеся отходами атомной промышленности, но при этом возникает ряд технических трудностей.

Основная трудность заключается в том, что исходные продукты деления имеют низкую удельную активность и относительно малый период полураспада. Обработка их с целью разделения повышает удельную активность изотопов с большим периодом полураспада, но приводит к значительному удорожанию источника.

Следовательно, очень важно определить наиболее выгодную конфигурацию облучателя, при которой продукты деления с относительно низкой удельной активностью могут обеспечить необходимую для практики производительность при облучении того или иного продукта.

Существенное значение имеет и правильное конструктивное решение вопросов отвода тепла, выделяемого большой массой радиоактивных веществ, сконцентрированных в облучателе, создание удобной системы для смены изотопов в облучателе, устройство защиты, подачи и уборки облучаемого продукта и т. д.

В частности, при облучении зерна целесообразно использовать выделяемое тепло для его подсушивания и таким образом совместить облучение с подсушкой. Это значительно повысило бы рентабельность использования продуктов деления.

Конфигурация облучателя должна обеспечивать максимальную поверхность соприкосновения облучаемого продукта с излучателем, что дает возможность получить

высокую производительность единицы объема облучающего устройства. Это очень важно при использовании изотопов с низкой удельной активностью, так как позволяет создать устройство с приемлемыми для практики габаритами и достаточной общей производительностью. Существенным параметром, с точки зрения экономики, является также количество изотопов, требующееся для обеспечения заданной производительности.

При рассмотрении вопроса об использовании продуктов деления урана в качестве источника γ -излучения для стерилизации вредителей зерна мы исходили из следующих основных данных: зерновая насыпь имеет плотность $0,85 \text{ г/см}^3$, зерно без затруднения может просыпаться в больших количествах через трубы или зазоры диаметром или шириной не менее 10 см . В более узких трубах или зазорах зерно при просыпании может образовать пробку.

Для стерилизации насекомых, находящихся в зерне, необходима доза излучения около $10\,000 \text{ р}$. При этом в облучаемом объеме не должно быть мест, где доза была бы ниже 5000 р [7] и выше $30\,000 \text{ р}$. Производительность облучения должна быть не ниже 20 т зерна в час при таких габаритах и весе, которые допускают транспортировку облучателя от одного зернохранилища к другому.

Для γ -активных изотопов в смеси продуктов деления за исходную принята удельная активность в 1 кюри/г . Если исходить из того, что содержание γ -активных и β -активных изотопов в смеси примерно одинаково, то общая удельная активность смеси составит 2 кюри/г .

Плотность продуктов деления принята равной $\rho=2 \text{ г/см}^3$, γ -постоянная $k=4 \text{ р/м кюри час см}$, энергия γ -излучения $0,7 \text{ Мэв}$.

Для того чтобы потери на самоослабление не превышали 10% , толщина слоя излучателя везде принята равной 2 см .

Большие массы продукта можно облучать, поместив продукт внутри цилиндрического источника излучения или между двумя плоскостями, или, наоборот, поместив источник излучения в виде длинного стержня в центр облучаемого продукта.

В этих случаях почти вся масса засыпанного в облучатель продукта, кроме незначительной части на концах облучателя, облучается достаточной дозой. Если продукт

будет двигаться вдоль облучателя, то и эта часть, попадая при перемещении в места с более высокой интенсивностью излучения, получит необходимую дозу. Для упрощения расчетов можно предположить, что продукт насыпан в облучатель и находится во время облучения без движения.

Ниже рассматриваются различные типы облучателей.

Цилиндрический облучатель

Рассчитаем зависимость производительности облучателя от его радиуса при постоянной длине $L=100 \text{ см}$ и дозе в воздухе в центре (точка O на рис. 5, а) $D_{\text{ц}}=10\,000 \text{ р}$.

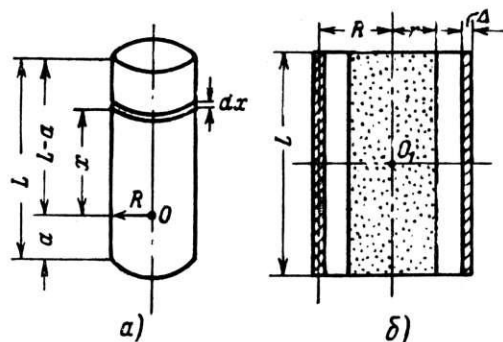


Рис. 5. Схема расчета производительности цилиндрического облучателя.

Толщину слоя изотопов Δ во всех случаях принимаем равной 2 см . Для того чтобы соблюсти требуемые условия равномерности облучения зерна, будем считать, что радиус цилиндрического объема, заполненного зерном, меньше внутреннего радиуса облучателя (рис. 5, б). Отношение радиусов $R/r=1,7$ во всех случаях будем считать постоянным, так как это отношение, как показывают дополнительные расчеты, во всех практически важных случаях обеспечивает необходимую степень равномерности облучения зерна. За расчетный радиус облучателя принимаем расстояние от центра до середины толщины стенки, как показано на рис. 5, б.

В зависимости от радиуса r объема, засыпанного зерном, вес последнего будет определяться для выбранных исходных данных соотношением

$$g = 0,267 \cdot r^2. \quad (4)$$

Время облучения в часах, необходимое для

получения $D_{\text{ц}} = 10\,000$ р и выбранных величин, будет равно

$$t_{\text{ц}} = \frac{0,05}{\arctg \frac{29,5}{r}} \quad (5)$$

Часов и производительность облучателя без учета ослабления излучения в зерне

$$I = \frac{g}{t_{\text{ц}}} = 5,34 \cdot r^2 \cdot \arctg \frac{29,5}{r} \text{ кг/час.} \quad (6)$$

Однако, как показано ниже, пренебрежение ослаблением излучения в зерне допустимо

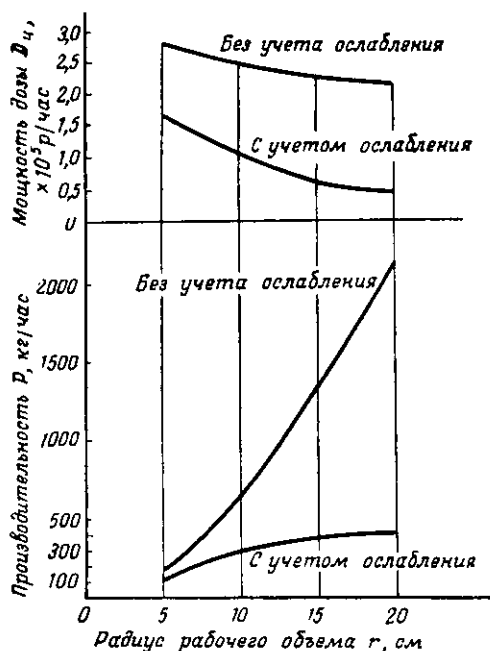


Рис. 6. Зависимость мощности дозы и производительности от радиуса рабочего объема.

только для таких малых величин r , которые уже не имеют практического значения. Расчет с учетом ослабления излучения в зерне дает:

$$D_{\text{ц}} = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot q \cdot k \cdot t \int_0^{1/2 L} \frac{e^{-\mu \sqrt{r^2 + \frac{x^2}{(R/r)^2}}}}{x^2 + R^2} dx. \quad (7)$$

Путем численного интегрирования формулы (7) и соответствующих расчетов находим дозы в центре облучателя и величины производительности при различных значениях r и R (при $R/r = 1,7 = \text{const}$).

Результаты этих расчетов приведены на рис. 6, из которого видно, что пренебрегать ослаблением излучения в зерне в подобных случаях нельзя. Увеличение радиуса облучателя, несмотря на резкое увеличение объема зерна, не приводит к значительному росту производительности. Выгоднее использовать несколько облучателей с малыми радиусами, чем один с большим.

Так, например, одному облучателю с $R = 34$ см по объему соответствует 16 облучателей с $R = 8,5$ см, а производительность будет не 424 кг/час, а $16 \cdot 110 = 1760$ кг/час, т. е. в 4,2 раза больше. При этом, конечно, возрастет и требуемое общее количество радиоактивных веществ. Однако в ряде случаев определяющим является увеличение производительности единицы объема облучателя.

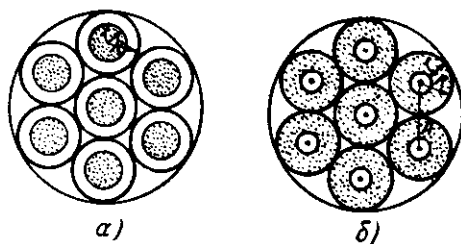


Рис. 7. Схемы цилиндрического (а) и стержневого (б) ячейковых облучателей.

Выгоднее всего поставить эти облучатели рядом, чтобы образовались общие стенки для смежных объемов (как показано на рис. 7, а), и придать ячейкам такого цилиндрического облучателя квадратную форму с закругленными углами. В этом случае изотопов потребуется меньше, чем при устройстве отдельных облучателей. Если выбрать квадратную форму основания размером $1,72 \times 1,72$ м² и длину 2 м (объем $\approx 5,9$ м³), то такой облучатель будет иметь $10 \times 10 = 100$ ячеек и часовую производительность 22 т/час. Основные параметры такого облучателя приведены в таблице на стр. 382.

Стержневой облучатель

Для стержневого облучателя примем расстояние от поверхности зерна до центра стержня таким же, как и в цилиндрическом, т. е. сохраним отношение $R/r = 1,7$ постоянным, но в этом случае R — радиус трубы, а r — толщина слоя зерна (рис. 7, б). Наименьшая

Сравнительные данные облучателей

Тип облучателя Данные	Единица измерения	Ячейковый цилиндрический $R=8,5$ см $r=5$ см	Ячейковый стержневой $R=17$ см $r=10$ см	Щелевой $d=17$ см $d_1=10$ см
Габариты	м	$1,72 \times 1,72 \times 2,0$	$1,7 \times 1,72 \times 2,0$	$1,72 \times 1,84 \times 2,0$
Объем	м ³	5,9	5,8	6,33
Число ячеек или щелей		$10 \times 10 = 100$	$5 \times 5 = 25$	10
Производительность	т/час	22	1	31
Вес продуктов деления	кг	3800	31,5	1860
Суммарная активность	кюри	$7,6 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^4$	$3,72 \cdot 10^6$
Вес изотопа при производительности 1 т/час	кг	173	31,5	60
Активность на 1 т/час	кюри	$3,45 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$
Производительность на 1 м ³ объема облучателя	т/час	3,75	0,172	4,9

доза в стержневом облучателе будет сообщаться периферийным слоям зерна. Для расчета возьмем точку соприкосновения двух труб (точка А на рис. 7, б), в которой доза создается излучением двух ближайших стержней, находящихся на расстоянии R . Не изменяя остальных параметров, проведем расчет для точки, лежащей на половине высоты облучателя. Тогда

$$D_A = 4 \cdot k \cdot q \cdot t \int_0^{1/2L} \frac{e^{-\mu \sqrt{r^2 + \frac{x^2}{(R/r)^2}}}}{x^2 + R^2} dx. \quad (8)$$

Учитывая, что зерно может свободно просыпаться через зазоры размером не меньше 10 см, в ячейковом цилиндрическом облучателе диаметр ячейки должен быть не менее $2R=17$ см ($2r=10$ см).

Для стержневого облучателя должны использоваться трубы диаметром не менее $2R=34$ см (слой $r=10$ см). В ранее выбранном объеме $\approx 5,9$ м³ таких стержневых облучателей длиной в 1 м будет 50 шт., или 25 шт. длиной 1 м.

В таблице даны значения производительности, суммарной активности и др.

Из этих данных видно, что требующееся количество изотопов на одну тонну в час при равномерном облучении ($R/r=1,7$) у стержневого облучателя в 5,5 раза меньше, чем у цилиндрического, но последний обладает в 22 раза большей производительностью на единицу объема.

Таким образом, поскольку применение цилиндрического облучателя позволяет брать

большее количество изотопов на единицу объема продукта, эти изотопы могут иметь значительно более низкую удельную активность, чем при использовании стержневого облучателя. Наоборот, при высокой удельной активности изотопов выгоднее применять стержневой облучатель, в котором излучение используется более полно.

Щелевой облучатель

Несмотря на удовлетворительную производительность, использование ячейкового цилиндрического облучателя представляет известную сложность из-за того, что трудно обеспечить одновременную равномерную подачу зерна в большое количество ячеек. Ниже рассматривается вариант ячейкового облучателя с ячейками в виде длинных щелей, образованных плоскими стенками, излучающими γ -лучи.

Доза в точке А (x_0, y_0, z_0) между двумя излучающими плоскостями (рис. 8, а) без учета поглощения в зерне будет равна

$$D_{\alpha} = 2 \cdot k \cdot q \cdot t \int_{-S/2}^{+S/2} \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{dx \cdot dy}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z_0^2}, \quad (9)$$

принимая $x_0=0$ и интегрируя по x , получаем:

$$D_A = 4 \cdot k \cdot q \cdot t \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{1}{\sqrt{(y-y_0)^2 + z_0^2}} \times \times \operatorname{arctg} \frac{S/2}{\sqrt{(y-y_0)^2 + z_0^2}} dy. \quad (10)$$

Ввиду того, что полученное выражение не интегрируется в элементарных функциях,

Чтобы облучение продукта было равномерным, примем его толщину $d_1 = 10$ см,

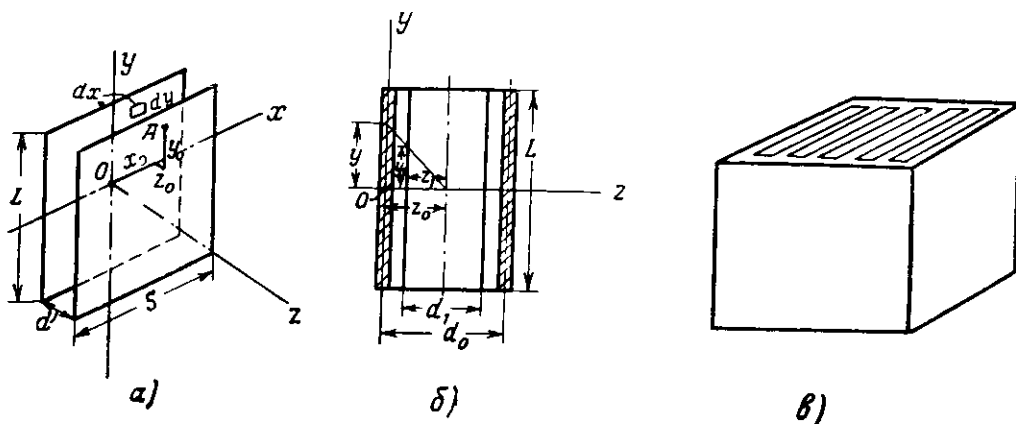


Рис. 8. Схема целевого облучателя.

решим его численно, считая $L = 100$ см, $S = 90$ см, $d = 17$ см и $z_0 = 8,5$ см. Полученное распределение мощностей доз по высоте зазора приведено на рис. 9 (кривая 1).

а расчетную ширину зазора $d_0 = 17$ см (рис. 8, б). При $x_0 = 0$

$$D_A = 2 \cdot q \cdot k \cdot t \int_{-S/2}^{+S/2} \int_{-L/2}^{+L/2} \frac{e^{-\mu \sqrt{x_1^2 + (y_1 - y_0)^2 + z_1^2}}}{x^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2} dx \cdot dy. \quad (11)$$

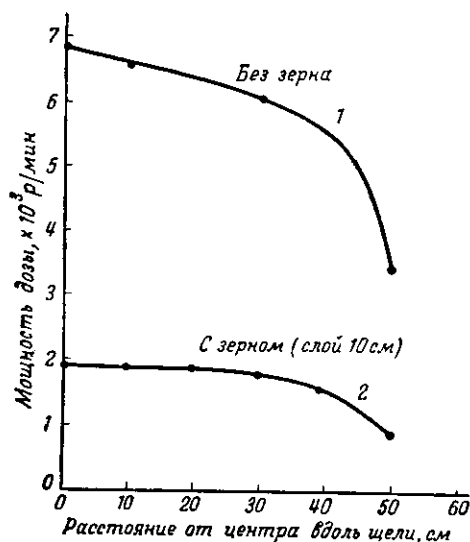


Рис. 9. Распределение мощности дозы по высоте зазора в целевом облучателе.

Поскольку в реальных условиях работы зазор будет заполнен зерном и распределение мощностей доз вследствие поглощения в нем будет иным, необходимо рассчитать и построить кривую мощностей дозы с учетом поглощения.

Интеграл решаем численно, принимая $z_0 = 8,5$ см, $z_1 = 5$ см. Для этого случая, т. е. для точек, лежащих на оси, получаем распределение мощностей доз, представленное на рис. 9 (кривая 2).

Из графиков рис. 9 видно, что дозы, рассчитанные с учетом поглощения, распределяются вдоль зазора весьма равномерно, так мощность дозы, даже на расстоянии 40 см от центра отличается от мощности дозы в центре не более чем на 15%. Однако абсолютные величины мощностей оказываются в 3—4 раза меньшими, чем при отсутствии зерновой насыпи. Аналогичное распределение доз будет и в горизонтальном направлении.

Во всех предыдущих расчетах мы исходили из того, что толщина слоя зерна в зазоре $d_1 = 10$ см, т. е. минимальной величине, при которой еще возможно свободное просыпание зерна в зазоре. Ориентировочные расчеты показывают, что при толщине слоя зерна выше 10 см производительность установки не возрастает.

Поэтому следует считать, что $d_1=10$ см является оптимальной величиной. Если размеры облучателя аналогичны предыдущим, то элементарный расчет показывает, что установка объемом $1,72 \times 1,84 \times 2,0$ м = $=6,33$ м³ имеет производительность ~ 31 т/час при толщине слоя зерна в зазоре $d_1=10$ см.

Все основные параметры такого облучателя также указаны в таблице.

Данные таблицы с очевидностью показывают преимущества щелевого облучателя, обладающего максимальной производительностью на единицу объема.

Следует отметить, что если отказаться от равномерного облучения в зазорах щелевого облучателя и, не увеличивая толщину слоя зерна ($d=10$ см), сдвинуть стенки щелей, то производительность единицы объема облучателя может быть еще более увеличена.

Общая конструкция облучателя

Рассмотрение вышеизложенных расчетов показывает, что наилучшим является щелевой облучатель (см. рис. 8, в), позволяющий добиться максимальной производительности при достаточной равномерности облучения, сравнительно небольших размерах и меньшем количестве изотопов на 1 т/час, чем у ячеекового цилиндрического облучателя. Кроме того, в щелевом облучателе значительно проще обеспечить использование тепла,

выделяемого изотопами, для подсушивания зерна во время облучения.

Щелевой облучатель размером $1,72 \times 1,84 \times 2$ м³ можно установить на платформу и перевозить от одного зернохранилища к другому. Защита облучателя может быть комбинированной: с одной стороны, бак облучателя следует снабдить защитными стенками и отодвигающимися защитными верхней и нижней крышками; и с другой стороны, облучатель должен быть огражден, чтобы персонал не мог приблизиться к установке на чрезмерно близкое расстояние. Такое ограждение значительно снижает требования к защите, вследствие чего вес всей установки может быть уменьшен.

Ориентировочный расчет показывает, что вес свинцовой защиты равен 37 т, а вес всего облучателя с учетом веса продуктов деления и веса конструкции—около 50 т. Специальный бункер, установленный над облучателем, насыпает в каждую щель нужное количество зерна. Под облучателем на время работы помещается конвейер или система шнеков, постоянно убирающих облученное зерно из-под облучателя.

Таким образом, вся установка состоит из трех независимых частей, объединяемых только при облучении: бункера с загрузочным конвейером, облучателя на платформе и механизма, убирающего с нужной скоростью зерно из-под облучателя.

Поступила в редакцию 2 VIII 1956 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Industrial uses of Radioactive Fission Products, A Report of the USAEC, Stanford, Sept. 1951.
2. L. E. Crean et al., Nucleonics 11, № 12, 32 (1953).
3. Дж. Дж. Балмер, Л. Э. Браунелл, Применение радиоактивных изотопов в промышленности, медицине, и сельском хозяйстве (Доклады иностранных ученых на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии). Изд. АН СССР, 1956, стр. 425.
4. R. S. Hannan, Scientific and technological involved in using ionizing radiations for the preservation of food. Department of scientific and industrial research. Food investigation. Special Report, № 61, London, 1955.
5. J. W. Loeding et al., Nucleonics 12, № 5, 15 (1954).
6. J. V. Nephias et al., Amer. J. Phys. 22, № 2, 88 (1954).
7. А. А. Передельский, А. В. Бибергаль и др., Биофизика (в печати).
8. А. В. Бибергаль, У. Я. Маргулис, Эскизный проект установки для экспериментального облучения зерна. АН СССР, 1956 (не опубликовано).
9. А. В. Бибергаль, Е. С. Перцовский, Биофизика 1, вып. 8, 696 (1956).
10. А. В. Бибергаль, У. Я. Маргулис, Н. С. Никитин, Л. В. Воробьева, В. Е. Бусыгин, В. И. Местинская, Отчет АМН СССР, 1952 г.